第47卷　第4期
2024年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 4
Apr. 2024

1970—2020年黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水时空变化研究及驱动因素分析

黎　珩，朱冰冰，边　熇，王　蓉，唐馨怡

（陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119）

摘　要： 黄土高原水蚀风蚀交错区作为中国北方典型的生态脆弱区，因其独特地形和气候条件，极端降雨事件对其环境和生态系统的影响更加突出。选取水蚀风蚀交错区28个气象站点，结合RClimDex模型计算11个极端降水指数，采用线性相关分析法、Mann-Kendall趋势检验法和小波交叉法，分析了1970—2020年黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水事件时空分布特征，探讨了极端降水事件的驱动因素。结果表明：（1）1970—2020年水蚀风蚀交错区持续干燥日数（CDD）呈下降趋势，其余10个指数呈上升趋势，反映出近50 a研究区极端降水事件的频率、量级和强度不断增加。交错区年降水量增加和极端降水事件增加具有密切关系，且极端降水事件增加主要是由中雨日数（R10）和大雨日数（R20）引起。（2）1970—2020年极端降水事件在全区整体为增加趋势，交错区中部和西南部极端降水事件显著发生，陕西段极端降水量和强度呈显著增加趋势且极端化程度更显著。（3）湿日总降水量（PRCPTOT）、暴雨日数（R25）、5 d最大降水量（R5d）3个极端降水指数，与影响因子厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）、东亚夏季风（EASM）和太阳黑子（SN）具有不同的功率，与SN的交叉小波变换功率最大，说明影响因子中SN和极端降水指数的相关性最高，SN对极端降水事件的影响最大。

关 键 词： 水蚀风蚀交错区；极端降水；时空特征；交叉小波；黄土高原

文章编号： 1000-6060(2024)04-0539-10(0539~0548)

联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第六次报告指出全球平均表面气温在2010—2019年较1850—1900年增加了0.9~1.2 ℃[1]。随着全球变暖，水循环能力增强，势必会造成区域性降雨增多。近50 a以来，极端降水事件在许多地区甚至国家均呈现出上升趋势[2-4]。2021年我国河南郑州发生特大暴雨，造成1.201×10^{11}元经济损失和超过1479×10^{4}人受灾[5]。极端降水事件不仅产生洪涝、干旱等自然灾害，也对人类社会经济文化发展造成严重影响，目前学术界对极端气候尤其是极端降水事件的关注程度不断增加。

在持续增暖背景下，干旱、半干旱区降水趋于极端化[6-7]。黄土高原是我国重要的生态屏障，该区地貌类型复杂，极端降水强度的增加会加剧浅层滑坡等重力侵蚀的发生[8]，同时也可能造成土壤侵蚀以及淤地坝和小型水库的冲毁[9]，增加致灾风险，影响黄土高原生态建设的可持续性。已有不少学者利用极端降水指数分析了黄土高原极端降水的时空变化特征，陈效逑等[10]认为中国黄河流域极端降水河源区呈显著增加趋势，而中部和东部呈显著减少趋势。杨维涛等[11]对黄土高原极端降水的时空变化进行了研究，发现年降水总量、强度和强降水事件均呈上升趋势，但上升趋势不明显，皆接近均值。各极端降水指数空间差异明显，存在一定空间异质性，这为复杂气候条件下的黄土高原水蚀风蚀

收稿日期： 2023-04-28；　**修订日期：** 2023-07-06

基金项目： 陕西省重点研发计划"沙漠-黄土过渡带植被结构特征阈值与提质增效关键技术研究"(007106191063)资助

作者简介： 黎珩(2000-)，女，硕士研究生，主要从事气候与水土保持研究. E-mail: 20212260@snnu.edu.cn

通讯作者： 朱冰冰(1980-)，女，博士，副教授，主要从事土壤侵蚀与水土保持研究. E-mail: zbb1026@126.com

交错区极端降水研究提供了指导。

黄土高原北部长城沿线一带的水蚀风蚀交错区是黄土丘陵沟壑区向毛乌素沙漠的过渡地带[12]，是极为典型的气候敏感区和生态环境脆弱区[13]。区内水蚀、风蚀全年交替进行，降水不仅导致强烈的水力侵蚀，而且加剧了后期的风蚀[14]。因此，迫切需要研究水蚀风蚀交错区在极端降水事件下的时空变化特征。目前，有关水蚀风蚀交错区的研究多集中在风水交互侵蚀的作用过程和机理[15]、植被动态变化及其与水沙的相关关系方面[16]，对气候因子的演变方面重视不够。本研究选取水蚀风蚀交错区28个气象站点，通过RClimDex模型计算11个极端降水指数，利用线性相关分析法、Mann-Kendall趋势检验法和小波交叉法对近50 a黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水时空变化进行研究，探索极端降水趋势、分布格局和驱动因素。以便政府和有关部门对极端降水事件作出快速响应，减少损失；同时，对防治强烈水土流失，减少入黄泥沙，促进区域可持续发展具有重要影响。

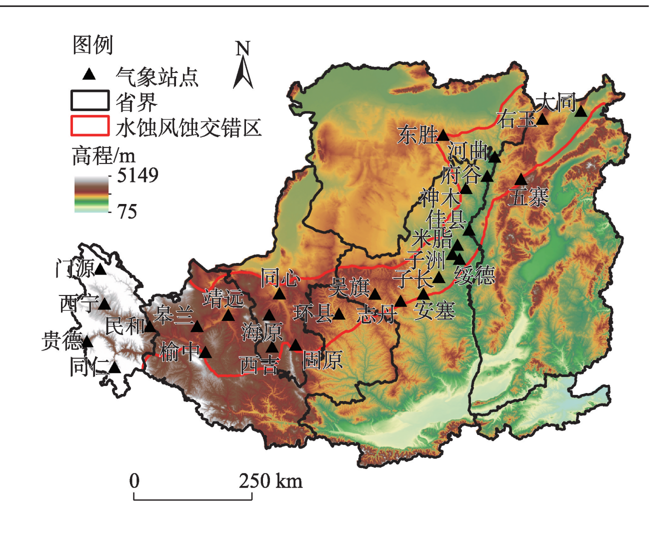
1 研究区概况

黄土高原水蚀风蚀交错区(35°20′~40°10′N，103°33′~113°53′E)是中国西北地区一个重要的自然地理单元，属半干旱草原地带，由沟壑区向沙漠进行过渡，年降水量为250~450 mm，是黄土高原最脆弱的地貌区域之一[17]。该区北起长城沿线，南至神池、灵武、兴县、绥德、吴旗、环县、固原、安定、东乡一线[18]，包括陕西省、山西省、甘肃省、青海省、内蒙古自治区和宁夏自治区的113个区县(图1)，该区以北为风蚀区，以南为水蚀区。气候条件和地质构造复杂，水蚀风蚀交错，强烈的风水复合侵蚀使得区域更加特殊，对极端降水事件的响应更加敏感。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究气象数据来源于国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。根据数据完整性和连续性原则，提取了研究区域内的28个气象站点1970—2020年日降水量数据，运用RClimDex软件对数据进行质量控制，以及缺失值填充和异常值处理[20]。



注：交错区界限引用自杨灿等[19]。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 黄土高原水蚀风蚀交错区地理位置及气象站点

Fig. 1 Geographical location and meteorological stations of water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau

东亚夏季风数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)。ENSO数据来源于NOAA地球系统研究实验室(http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/)，水文要素与NINO3.4区海温之间为较显著相关关系[21]，用Nino3区(5°S~5°N，150°~90°W)海温数据来表征。太阳黑子数据来源于比利时皇家天文台太阳数据分析中心(http://www.sidc.be/silso/datafiles)。

2.2 研究方法

2.2.1 极端降水指数 ETCCDMI定义了11个极端降水指数和16个极端气温指数[22]，用于定量研究极端气候的时空变化特征。本文采用了11个极端降水指数(表1)，其中1日最大降水量(R1d)和5日最大降水量(R5d)以年尺度为衡量标准，暴雨日数的降水量取25 mm作为标准[23]。

2.2.2 线性相关分析 相关分析通常可以用来分析两组或多组数据变化趋势的一致性，本文利用Pearson相关分析研究极端气候事件与影响因素之间的相关关系。相关系数(r)的表达式为：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)\left(Y_i-\bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2}} \tag{1}$$

式中：n为样本数量；X_i为X对应i的观测值；$\bar{X}$为样本均值；Y_i为Y对应i的观测值；$\bar{Y}$为样本均值；r

表1　极端降水指数定义与分类

Tab. 1　Definition and classification of extreme climate indices

类型	指数名称	指数代码	定义	单位
持续指数	持续湿润日数	CWD	日降水量≥1 mm的最长连续日数	d
	持续干燥日数	CDD	日降水量<1 mm的最长连续日数	d
	湿日总降水量	PRCPTOT	年全部雨(雪)日降水量之和	mm
绝对指数	中雨日数	R10	每年日降水量≥10 mm的总日数	d
	大雨日数	R20	每年日降水量≥20 mm的总日数	d
	暴雨日数	R25	每年日降水量≥25 mm的总日数	d
相对指数	强降水量	R95P	每年日降水量>95%分位值的降水量之和	mm
	极强降水量	R99P	每年日降水量>99%分位值的降水量之和	mm
强度指数	1日最大降水量	R1d	年内1日最大降水量	mm
	5日最大降水量	R5d	年内5日最大降水量	mm
	降水强度	SDII	年内日降水量≥1 mm的总量与总日数的比值	mm·d^{-1}

的范围为−1~1,绝对值越接近1,相关性越高。r=0时,相互独立;r>0时,为正相关关系;r<0时,为负相关关系。

2.2.3　交叉小波变换　2个时间序列X和Y的交叉小波变换定义为:

$$W_n^{XY} = W_n^X \times W_n^{Y*} \quad (2)$$

式中:W_n^{XY}为时间序列X_n和Y_n的交叉小波系数矩阵;W_n^X为时间序列X_n的小波系数矩阵;W_n^Y为时间序列Y_n的小波系数矩阵;W_n^{Y*}为复共轭矩阵。交叉小波变换功率为$|W_n^{XY}|$,功率越大,则彼此相关显著。

2.2.4　Mann-Kendall趋势检验　设$X_1, X_2, \cdots, X_n$为时间序列变量,n为时间序列长度,因此定义趋势检验统计量S和服从正态分布统计量Z为:

$$S = \sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{i-1}\mathrm{sgn}\left(X_i - X_j\right) \quad (3)$$

$$\mathrm{sgn}\left(X_i - X_j\right) = \begin{cases} 1, & X_i - X_j > 0 \\ 0, & X_i - X_j = 0 \\ -1, & X_i - X_j < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} (S-1)\sqrt{\mathrm{Var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)\sqrt{\mathrm{Var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:S服从正态分布,其均值为0,方差为$\mathrm{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$。sgn为符号函数;$X_i$为第$i$年对应值;$X_j$为第$j$年对应值。在趋势检验中,如果$|Z| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$零假设不成立,表明在置信水平$\alpha$时,时间序列数据有显著变化趋势。

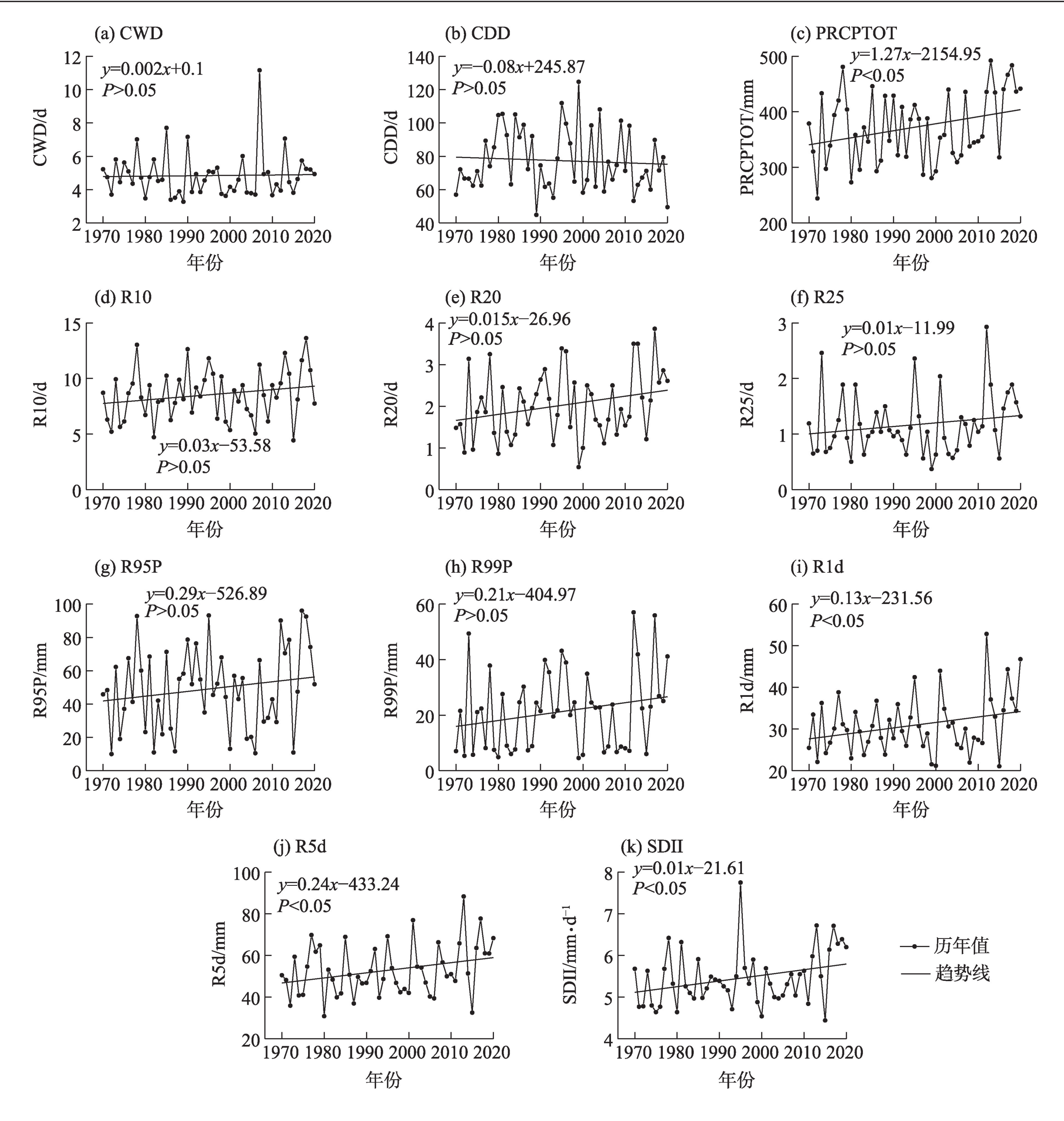
3　结果与分析

3.1　极端降水时间变化特征

对极端降水指数进行了趋势变化分析(图2),持续干燥日数(CDD)为下降趋势,下降速率为0.8 d·(10a)$^{-1}$(P>0.05),其余10个极端降水指数均表现出不同程度上升趋势,持续湿润日数(CWD)增速为0.02 d·(10a)$^{-1}$(P>0.05),湿日总降水量(PRCPTOT)增速为12.7 mm·(10a)$^{-1}$(P<0.05),中雨日数(R10)增速为0.3 d·(10a)$^{-1}$(P>0.05),大雨日数(R20)增速为0.15 d·(10a)$^{-1}$(P>0.05),暴雨日数(R25)增速为0.1 d·(10a)$^{-1}$(P>0.05),强降水量(R95P)增速为2.9 mm·(10a)$^{-1}$(P>0.05),极强降水量(R99P)增速为2.1 mm·(10a)$^{-1}$(P>0.05),1日最大降水量(R1d)增速为1.3 mm·(10a)$^{-1}$(P<0.05),5日最大降水量(R5d)增速为2.4 mm·(10a)$^{-1}$(P<0.05),降水强度(SDII)增速为0.1 mm·d^{-1}·(10a)$^{-1}$(P<0.05)。

CDD下降、CWD和PRCPTOT上升,反映出1970—2020年水蚀风蚀交错区降水持续日数不断增多,交错区逐渐湿润化。R10、R20和R25的上升趋势反映出近50 a交错区极端降水日数不断增多,极端降水事件发生的频率日益增加。R95P和R99P的上升趋势反映出交错区极端降水量逐渐增多。R1d和R5d的上升趋势反映出交错区极端降水强度不断加强。总的来说,1970—2020年水蚀风蚀交错区极端降水增加、极端降水事件的持续时间、强度和频率均增加。

对11个极端降水指数和年降水量进行相关性



注:CWD为持续湿润日数;CDD为持续干燥日数;PRCPTOT为湿日总降水量;R10为中雨日数;R20为大雨日数;R25为暴雨日数;R95P为强降水量;R99P为极强降水量;R1d为1日最大降水量;R5d为5日最大降水量;SDII为降水强度。下同。

图2 1970—2020年黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水指数时间变化趋势

Fig. 2 Time variation trend of extreme precipitation index in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau from 1970 to 2020

分析(表2),除CDD与年降水量(Pre)呈负相关关系外,其余指数与Pre均呈显著正相关。其中,Pre和PRCPTOT、R10、R20的相关系数分别为0.99、0.96、0.88,远大于年降水量和其他极端指数的相关系数,说明交错区年降水量增加主要来源于极端降水事件增加。PRCPTOT和R10、R20的相关系数分别为0.96、0.89,说明极端降水事件增加主要是由R10和R20引起的。

3.2 极端降水空间变化特征

对28个站点每年的11个极端指数进行克里金插值得到极端降水指数的年空间变化分布,利用Mann-Kendall趋势检验法对1970—2020年极端指数空间变化进行显著性分析(图3),发现极端降水事件主要发生在交错区中部和西南部,其中陕西段为极显著增加趋势(Z>2.58)。R10、R20和R25在全区整体为增加趋势,显著增加主要集中在交错区中

表2　1970—2020年水蚀风蚀交错区极端降水指数相关系数

Tab. 2　Phase relationship of extreme precipitation index in the water-wind erosion crisscross region from 1970 to 2020

参数	Pre	CDD	CWD	PRCPTOT	R10	R20	R25	R95P	R99P	R1d	R5d
CDD	−0.24										
CWD	0.54**	−0.16									
PRCPTOT	0.99**	−0.24	0.54**								
R10	0.96**	−0.20	0.60**	0.96**							
R20	0.88**	−0.12	0.39**	0.89**	0.86**						
R25	0.83**	−0.08	0.36**	0.84**	0.79**	0.96**					
R95P	0.78**	−0.01	0.29*	0.78**	0.76**	0.88**	0.89**				
R99P	0.69**	−0.01	0.25	0.70**	0.64**	0.73**	0.77**	0.90**			
R1d	0.68**	−0.07	0.09	0.69**	0.57**	0.69**	0.73**	0.70**	0.79**		
R5d	0.79**	−0.08	0.42**	0.80**	0.74**	0.81**	0.82**	0.76**	0.78**	0.84**	
SDII	0.77**	0.01	0.29*	0.77**	0.76**	0.89**	0.91**	0.82**	0.75**	0.77**	0.85**

注：Pre为年降水量。*表示通过0.05显著性水平检验，**表示通过0.01显著性水平检验。

部。R95P和R99P呈现出增加趋势，宁夏段和甘肃段为显著增加（$1.96<Z<2.58$）。R1d在陕西段表现为显著增加，R5d在晋陕蒙交界区表现为不显著减少趋势（$-1.96<Z<0$），SDII在宁夏段、甘肃段和陕西段表现出显著增加趋势。CWD在宁夏段、青海段、甘肃段和陕西段表现为显著增加趋势，而CDD在陕西段表现为显著减少趋势。交错区中部和西南部极端降水事件频发，陕西段极端降水量和强度呈显著增加趋势，降水趋于极端化。

3.3　极端降水驱动因素分析

本文选择了厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）、东亚夏季风（EASM）和太阳黑子（SN）3个大尺度因子，以及持续指数、绝对指数和强度指数中最有代表性的PRCPTOT、R25和R5d指数，绘制交叉小波功率图谱（图4），分析驱动因子对水蚀风蚀交错区极端气候事件的影响。

ENSO与PRCPTOT在1983—1988年存在3~5 a显著共振周期。ENSO与R25在1971—1975年存在3~4 a显著共振周期，在1980—1988年存在2~4 a显著共振周期，在1989—2004年存在5~7 a显著共振周期。ENSO与R5d在1981—1990年存在2~4 a显著共振周期，1992—2004年存在5~7 a显著共振周期，在2012—2017年存在2~4 a显著共振周期。EASM与PRCPTOT在1978—1985年存在2~4 a显著共振周期，1995—1999年存在1~3 a显著共振周期，2009—2019年存在4~7 a显著共振周期。EASM与R25在1977—1986年存在1~4 a显著共振周期，1990—1998年存在5~7 a显著共振周期，2007—2020年存在4~8 a显著共振周期。EASM与R5d在1978—1986年存在2~4 a显著共振周期，2009—2019年存在4~7 a显著共振周期。SN与PRCPTOT在1971—2001年存在7~13 a显著共振周期。SN与R25在1972—1996年存在8~12 a显著共振周期。SN与R5d在1971—1998年存在8~13 a显著共振周期。

PRCPTOT、R25、R5d 3个极端降水指数和驱动因子ENSO、EASM和SN具有不同的功率，与SN的交叉小波变换功率最大。说明极端降水指数和驱动因子具有不同程度的相关性，极端降水指数和驱动因子SN的相关性最高，即SN对极端降水事件的影响最大。

4　讨　论

本文对黄土高原风蚀水蚀交错区1970—2020年极端降水事件的时空变化特征研究发现，除持续干燥日数减少外，其余11个指数呈上升趋势。朱飙[24]对西北地区气候进行研究，发现西北地区暴雨降水量增多，极端降水强度增加。慎璐璐等[25]分析了黄河流域极端气温和极端降水的变化规律特征，与本文研究结果一致，其他对黄土高原地区极端降水变化的研究中也有相似结论[26-27]。但以上研究皆是基于西北、黄土高原等地理分区进行极端气候研究，将水蚀风蚀交错区作为研究区的组成部分进行分析，对交错区整体的研究较少。且对交错区的研究更注重于复合侵蚀的机理部分，对气候尤其是极端

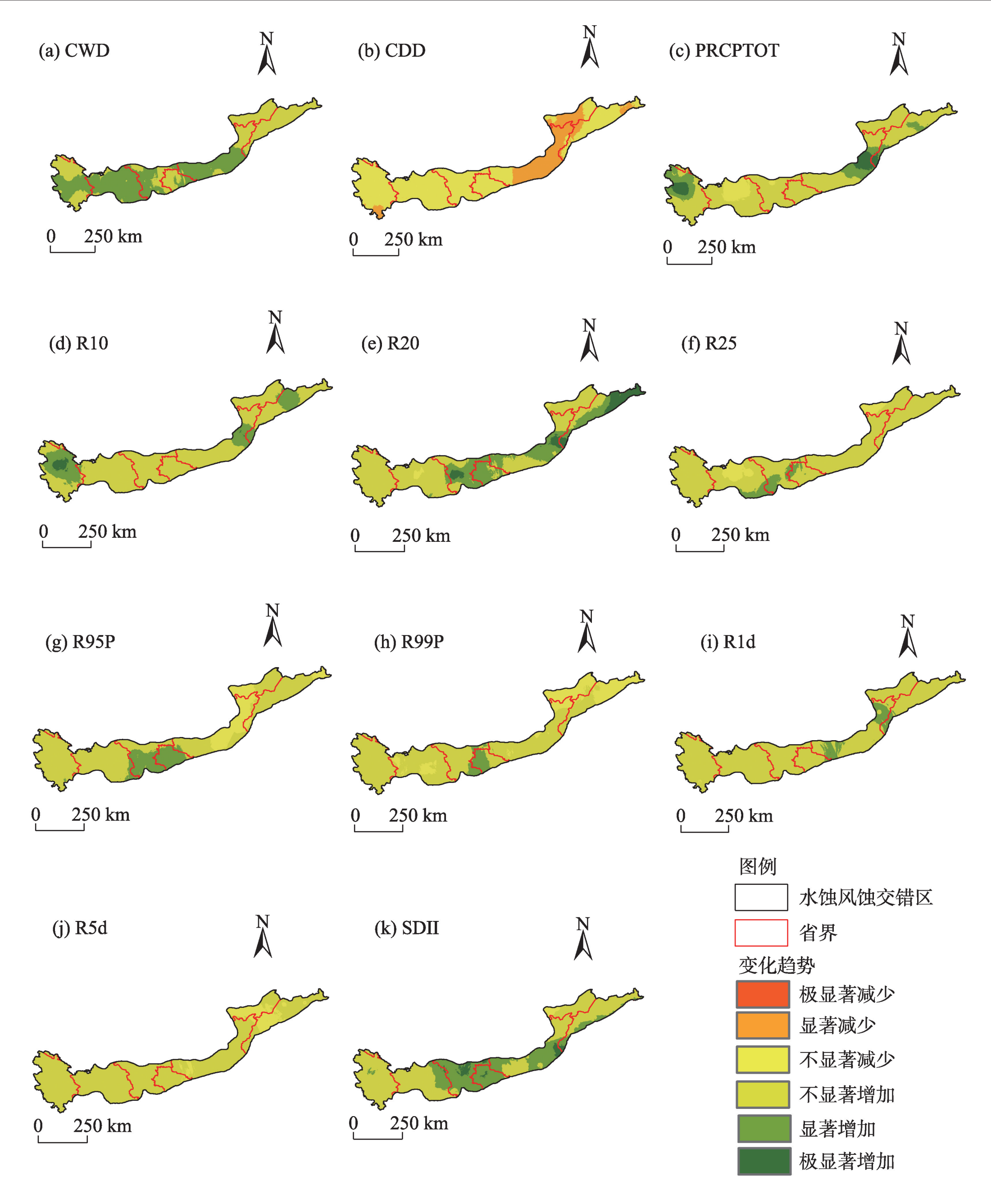
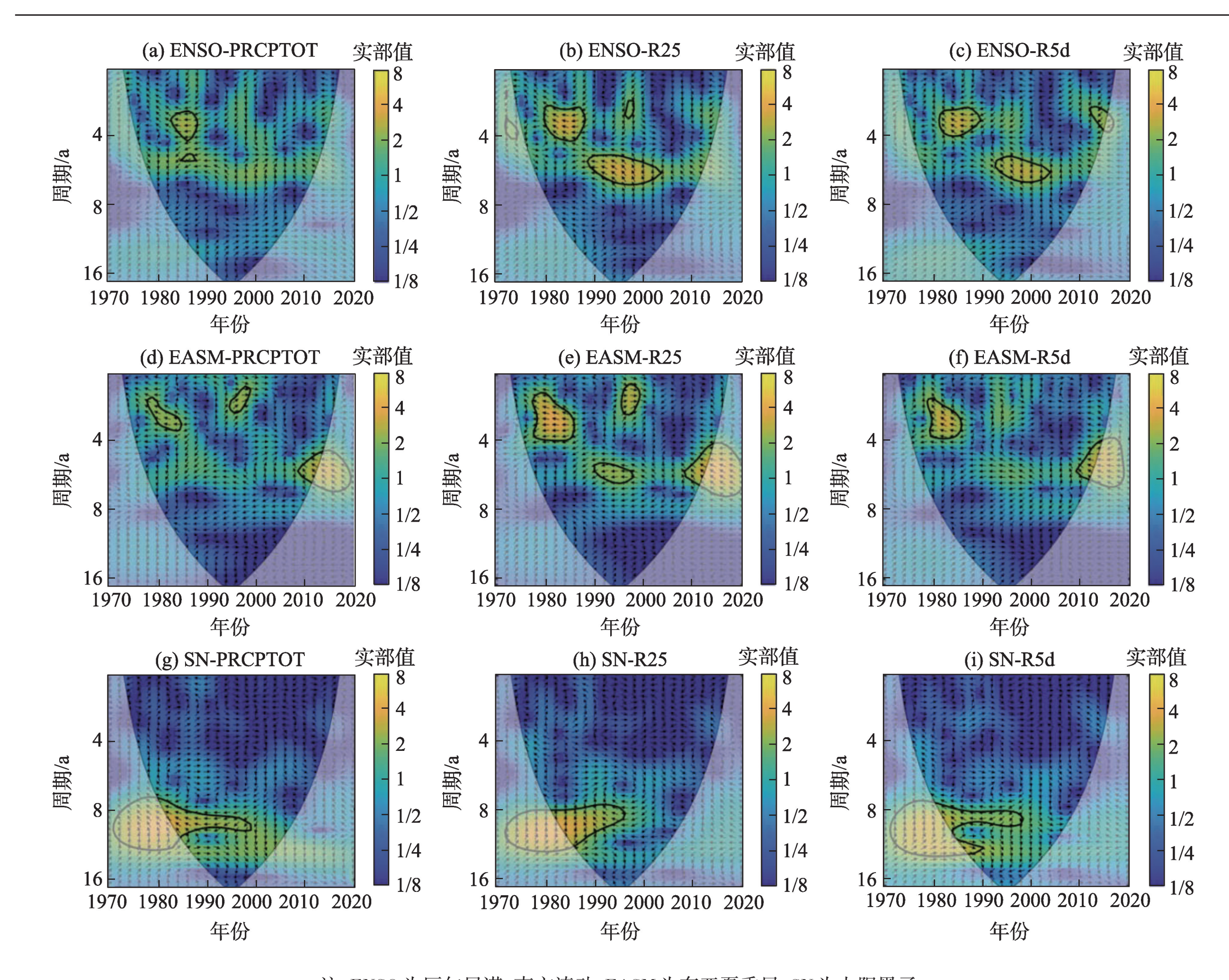


图3　1970—2020年水蚀风蚀交错区极端降水变化趋势分布

Fig. 3　Trend distribution of extreme precipitation in the water-wind erosion crisscross region from 1970 to 2020

降水方面不够重视。因此本文将交错区作为整体研究对象，分析了其时间空间变化特征，在此基础上引入了驱动因子分析。

Zhao 等[28]认为黄土高原水蚀风蚀交错区1958—2015年标准化降水指数呈下降趋势，干旱程度可能继续增加，与本文研究不一致。这可能因为我国降水存在年际准周期振荡[29]，近十几年黄土高原逐渐变湿，2014—2020年是过去250 a中的第2个最湿润时期[30]。本研究发现，极端降水事件显著发生在交错区中部和西南部。徐洁等[31]分析了宁夏南部山区，发现大部分地区极端降水指数正向变化率较高。刘新伟等[32]发现甘肃陇东南地区易出现极端暴雨，张菁等[33]发现陕甘宁三河源区极端降水强度、强降水日数增加。陕西省极端降水量和强度呈上升趋势，与李双双等[9]、史维良等[34]研究结果相似，且带来的暴雨洪涝已成为该省第二大自然灾害，故尤其需要重视陕西省的极端降水事件。交错区中部和西南部具有特殊的地理位置，其西面为



注：ENSO为厄尔尼诺-南方涛动；EASM为东亚夏季风；SN为太阳黑子。

图4　1970—2020年水蚀风蚀交错区极端降水指数交叉小波功率谱

Fig. 4　Cross wavelet power spectrum of extreme precipitation index in the water-wind erosion crisscross region from 1970 to 2020

青藏高原东部边坡地带，东南面为秦岭的西延部分[32]，有利于低空急流的形成和维持，利于上升运动的增强，导致强降水产生[35]。

大气环流是影响天气和气候变化的重要因素。厄尔尼诺-南方涛动往往会引起全球性的气候异常[36]。东亚夏季风的变化对我国气候灾害的发生有重大影响[37]。SN频繁活动会引起地球上气候的剧烈变化，造成如极端高温、洪涝、干旱等严重自然灾害[38]。Zhou等[39]的研究表明，SN活动和厄尔尼诺-南方涛动均对降水产生直接或间接影响，进而影响研究区水文循环过程。Chen等[40]研究表明近几十年东亚夏季风减弱伴随西太平洋副高异常西伸，来自印度洋-太平洋的水汽不断向西北干旱区输送，西北干旱区由暖干化向暖湿化转变。本文在前人研究的基础上，进一步分析交错区的极端气候，特别是极端降水的驱动因素，主要从ENSO、EASM和SN 3个方面进行分析。研究发现降水指数和影响因子具有不同程度的相关，SN对极端降水事件的影响最大。故应关注SN变化趋势，加强极端降水监测与预警。

5　结　论

本文选取交错区28个气象站点日降水资料，结合RClimDex模型和11个极端降水指数，分析了1970—2020年黄土高原风蚀水蚀交错区极端降水事件时空分布特征，探讨了极端降水事件的驱动因素。主要结论如下：

（1）1970—2020年风蚀水蚀交错区CWD、PRCPTOT、R10、R20、R25、R95p、R99p、R1d、R5d、SDII呈上升趋势，CDD呈下降趋势。近50 a风蚀水蚀交错区极端降水事件的强度、频率和量级不断增加。交错区年降水量增加和极端降水事件增加具

有密切关系，且极端降水事件增加主要是由R10和R20引起。

（2）1970—2020年极端降水事件在全区整体为增加趋势，交错区中部和西南部极端降水事件显著发生，陕西段极端降水量和强度呈显著增加趋势且极端化程度更显著。

（3）影响因子上，PRCPTOT、R25、R5d 3个极端降水指数和影响因子ENSO、EASM和SN具有不同的功率，与SN的交叉小波变换功率最大，说明影响因子中SN和极端降水指数的相关性最高，SN对极端降水事件的影响最大。

参考文献（References）

[1] Legg S. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis[J]. Interaction, 2021, 49(4): 44-45.

[2] Brown P J, Bradley R S, Keimig F T. Changes in extreme climate indices for the northeastern United States, 1870—2005[J]. Journal of Climate, 2010, 23(24): 6555-6572.

[3] New M, Hewitson B, Stephenson D B, et al. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D14): D14102, doi: 10.1029/2005JD006289.

[4] Regoto P, Dereczynski C, Chou S C, et al. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(11): 5125-5142.

[5] 史文茹, 李昕, 曾明剑, 等. “7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 688-702. [Shi Wenru, Li Xin, Zeng Mingjian, et al. Multi-model comparison and high-resolution regional model forecast analysis for the “7·20” Zhengzhou severe heavy rain[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 688-702.]

[6] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004, 305(5686): 994-997.

[7] Perkins S, Alexander L, Nairn J. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(20): 20714, doi: 10.1029/2012GL053361.

[8] Li G K, Moon S. Topographic stress control on bedrock landslide size[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(5): 307-313.

[9] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 等. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 140-151. [Li Shuangshuang, Kong Feng, Han Lu, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation and influencing factors on the Loess Plateau in northern Shaanxi Province[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 140-151.]

[10] 陈效逑, 刘立, 尉杨平. 1961—2005年黄河流域极端气候事件变化趋势[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 3-5. [Chen Xiaoshu, Liu Li, Yu Yangping, et al. Variation trend of extreme climate events of the Yellow River Basin in 1961—2005 period[J]. Yellow River, 2011, 33(5): 3-5.]

[11] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1456-1466. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1456-1466.]

[12] 孙艳萍. 黄土高原水蚀风蚀交错带植被覆盖动态变化及其与气候因子的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. [Sun Yanping. Dynamic changes of vegetation cover and the relationship with climatic factors of the water-wind erosion crisscross region in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.]

[13] 卓静, 胡皓, 何慧娟, 等. 陕北黄土高原生态脆弱性时空变异及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1768-1777. [Zhuo Jing, Hu Hao, He Huijuan, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of ecological vulnerability in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1768-1777.]

[14] 殷敏峰, 邸明婷, 邓鑫欣, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带迎风坡水蚀影响的风蚀特征[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(5): 39-46. [Yin Minfeng, Di Mingting, Deng Xinxin, et al. Wind erosion characteristics on windward slopes affected by water erosion in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(5): 39-46.]

[15] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 165-172. [Li Qiuyan, Cai Qiangguo, Fang Haiyan. Advances in complex erosion of wind and water and ecological restoration[J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 165-172.]

[16] 王金花. 风蚀水蚀交错区流域植被覆被变化对水沙过程的作用机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. [Wang Jinhua. Impact of vegetation cover change on water and sediment procession in wind-water erosion crisscross region[D]. Xi’an: Xi’an University of Technology, 2017.]

[17] 孙艳萍, 张晓萍, 刘建祥, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带植被覆盖度动态变化[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1036-1043. [Sun Yanping, Zhang Xiaoping, Liu Jianxiang, et al. Dynamic change of vegetation coverage in water-wind erosion ecotone in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1036-1043.]

[18] 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J]. 水土保持研究, 1993(2): 2-15. [Tang Keli, Hou Qingchun, Wang Binke, et al. The environment background and administration way of wind-water erosion crisscross region and Shenmu experimental area on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1993(2): 2-15.]

[19] 杨灿, 魏天兴, 李亦然, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区退耕还林

工程前后NDVI时空变化特征[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 83-91. [Yang Can, Wei Tianxing, Li Yiran, et al. Spatiotemporal variations of NDVI before and after implementation of grain for green project in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 83-91.]

[20] 赵国永, 韩艳, 刘明华, 等. 1961—2013年河南省极端降水事件时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 115-120. [Zhao Guoyong, Han Yan, Liu Minghua, et al. Spatial-temporal variation of extreme precipitation events in Henan Province from 1961 to 2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 115-120.]

[21] 董林垚, 张平仓, 刘纪根, 等. 太阳黑子和ENSO对日本吉野川流域水文要素影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 671-680. [Dong Linyao, Zhang Pingcang, Liu Jigen, et al. Combined influence of solar activity and ENSO on hydrological processes in Yoshino River Basin, Japan[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 671-680.]

[22] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 752-760.

[23] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 1015-1026. [Wu Wenbo, You Qinglong, Wang Dai. Characteristics of extreme precipitation in China based on homogenized precipitation data[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(6): 1015-1026.]

[24] 朱飙. 西北地区气候暖湿化背景下水汽、潜在蒸散及极端温度和降水的变化特征[D]. 兰州：兰州大学, 2022. [Zhu Biao. Variation characteristics of vapor, potential evapotranspiration and extreme temperature and precipitation under the background of warming-wetting in northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.]

[25] 慎璐璐, 杨艳芬, 吴晶, 等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 231-242. [Shen Lulu, Yang Yanfen, Wu Jing, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 231-242.]

[26] Dong X, Zhang S, Zhou J, et al. Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River Basin (1960—2017), China[J]. Water, 2019, 11(11): 2334, doi:10.3390/w11112334.

[27] 任玉玲. 黄土高原极端气候变化及对河流水沙影响的评估与预测[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2022. [Ren Yuling. Evaluation and projection of extreme climate changes and its impacts on river runoff and sediment load on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.]

[28] Zhao X, Li Z, Zhu Q, et al. Change of precipitation characteristics in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau, China, from 1958 to 2015[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 8048, doi:10.1038/s41598-017-08600-y.

[29] Schär C, Lüti D, Beyrle U, et al. The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model[J]. Journal of Climate, 1999, 12(3): 722-741.

[30] Cai Q F, Liu Y, Fang C X, et al. Insight into spatial-temporal patterns of hydroclimate change on the Chinese Loess Plateau over the past 250 years, using new evidence from tree rings[J]. Science of the Total Environment, 2022, 850: 157960, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157960.

[31] 徐洁, 毕宇珠, 雷秋良, 等. 1961—2020年宁夏地区极端气候变化趋势及影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(12): 159-171. [Xu Jie, Bi Yuzhu, Lei Qiuliang, et al. Analysis of extreme climate change trends and influencing factors from 1961 to 2020 in Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(12): 159-171.]

[32] 刘新伟, 王澄海, 郭润霞, 等. 1981—2018年甘肃省极端暴雨天气过程的气候与环流特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(5): 750-758. [Liu Xinwei, Wang Chenghai, Guo Runxia, et al. Climate and circulation characteristics of extreme rainstorm processes in Gansu from 1981 to 2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(5): 750-758.]

[33] 张菁, 张珂, 王晟, 等. 陕甘宁三河源区1971—2017年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 288-294. [Zhang Jing, Zhang Ke, Wang Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia contiguous region from 1971 to 2017[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition), 2021, 49(3): 288-294.]

[34] 史维良, 车璐阳, 李涛. 陕西省汛期极端降水概率分布及综合危险性评估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1407-1417. [Shi Weiliang, Che Luyang, Li Tao. Probability distribution and comprehensive risk assessment of extreme precipitation in flood season in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1407-1417.]

[35] 赵庆云, 傅朝, 刘新伟, 等. 西北东部暖区大暴雨中尺度系统演变特征[J]. 高原气象, 2017, 36(3): 697-704. [Zhao Qingyun, Fu Chao, Liu Xinwei, et al. Characteristics of mesoscale system evolution of torrential rain in warm sector over northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(3): 697-704.]

[36] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与ENSO的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6402-6414. [Jia Yanqing, Zhang Bo, Zhang Yaozong, et al. Correlation analysis of variation of extreme temperature events and ENSO in Yangtze River Delta region during 1960—2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6402-6414.]

[37] 黄建平, 陈文, 温之平, 等. 新中国成立70年以来的中国大气科

学研究: 气候与气候变化篇[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1607-1640. [Huang Jianping, Chen Wen, Wen Zhiping, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Climate and climate change[J]. Scientia Sinica Terrae, 2019, 49(10): 1607-1640.]

[38] 陈文. 太阳黑子活动与海平面温度的相关性分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2022. [Chen Wen. Correlation analysis between sunspot activity and sea surface temperature[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2022.]

[39] Zhou T, Wu B, Dong L. Advances in research of ENSO changes and the associated impacts on Asian-Pacific climate[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 50: 405-422.

[40] Chen F, Chen J, Huang W, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales[J]. Earth-science Reviews, 2019, 192: 337-354.

Temporal and spatial changes in extreme precipitation and its driving factors in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau from 1970 to 2020

LI Heng, ZHU Bingbing, BIAN He, WANG Rong, TANG Xinyi

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: As a typical ecologically vulnerable area in northern China, the ecologically vulnerable area of the Loess Plateau is significantly affected by extreme rainfall events because of its unique topography and climatic conditions. Twenty-eight meteorological stations in the water-wind erosion crisscross region were selected, and eleven extreme precipitation indices were calculated using the RClimDex model. Linear correlation analysis, the Mann-Kendall trend test, and the wavelet crossing method were used to analyze the spatial-temporal distribution characteristics of extreme precipitation events in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau from 1970 to 2020. Driving factors for extreme precipitation events are discussed. The results are as follows: (1) The number of continuous dry days in the water and wind erosion interlacing zone from 1970 to 2020 shows a decreasing trend, whereas the other 10 indices show an increasing trend, reflecting the increasing frequency, magnitude, and intensity of extreme precipitation events in the study area during the past 50 years. There is a close relationship between increases in annual precipitation and extreme precipitation events, and an increase in extreme precipitation events is mainly caused by the number of moderate and heavy rain days. (2) Extreme precipitation events show an increasing trend in the entire region from 1970 to 2020, with significant extreme precipitation events occurring in the central and southwest parts of the crisscross region. The extreme precipitation and intensity in the Shaanxi section show a significant increasing trend, and the extreme degree is very significant. (3) The three extreme precipitation indices, total wet day precipitation, number of heavy rain days, and 5-day maximum precipitation, have varying degrees of influence from El Nino-Southern Oscillation, East Asian Summer Monsoon, and sunspot number (SN), with cross wavelet transform with SN having the greatest influence. This shows that the correlation between SN and extreme precipitation index is the highest among the influencing factors, and SNs have the greatest influence on extreme precipitation events.

Key words: water-wind erosion crisscross region; extreme precipitation; temporal and spatial characteristics; cross wavelet; Loess Plateau